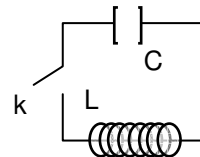


Apéndice 1

Nociones de Corriente Alterna

A.1 Oscilaciones en un Circuito LC

Considere el circuito que aparece en la figura, formado por un inductor y un capacitor conectados en serie. La llave k sirve para abrir y cerrar el circuito. La resistencia de los alambres es suficientemente pequeña como para no tomarla en cuenta ($R = 0$) y supondremos que inicialmente el condensador está cargado, con una carga q y con energía



$$E_c = \frac{1}{2} q^2/C .$$

Al cerrar la llave k, el condensador se descarga a través del inductor. Aparece una corriente variable en el circuito y una FEM inducida $\varepsilon_{ind} = -L di/dt$ en el inductor. Además, éste adquiere una energía

$$E_L = \frac{1}{2} Li^2,$$

que también varía con el tiempo.

Es posible obtener la expresión analítica de cómo varía con el tiempo la carga en el condensador considerando lo siguiente. Como $R = 0$, no hay pérdidas de energía, y se debe cumplir que la potencia disipada es nula:

$$P_{dis} = dE/dt = 0$$

Impongamos esta condición a la energía almacenada en el circuito en un instante determinado:

$$E = \frac{1}{2} q^2/C + \frac{1}{2} Li^2$$

Derivando respecto al tiempo e igualando a cero y simplificando se llega a la siguiente ecuación:

$$q/C + L di/dt = 0$$

Pero $\frac{di}{dt} = \frac{d(dq/dt)}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}$, y sustituyendo y agrupando términos arriba se obtiene:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{LC} = 0$$

Esta ecuación es análoga a la que se obtuvo al analizar el movimiento armónico simple (MAS),

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0$$

donde la carga q en el condensador ocupa el lugar de la elongación x , L sustituye a m y la constante k es sustituida por $1/C$. En el caso del MAS la solución toma la forma $x(t) = A \text{sen}(\omega t + \delta)$, donde $\omega = (k/m)^{1/2}$. Por tanto, en este caso la solución para la carga en el condensador será, por analogía:

$$q = q_0 \text{sen}(\omega t + \delta)$$

donde

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

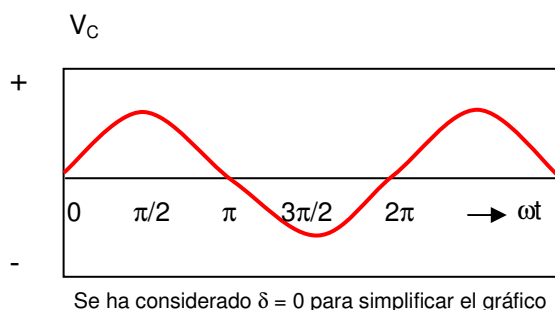
El potencial instantáneo en el condensador se obtiene dividiendo por la capacidad, que es constante:

$$V_C = (q_0/C)\text{sen}(\omega t + \delta)$$

Este resultado nos indica que la polaridad en las placas del condensador cambia continuamente con el transcurso del tiempo (ver figura)

La frecuencia de cambio viene dada por la expresión $f_0 = \omega_0/2\pi$:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



La frecuencia f_0 recibe el nombre de *frecuencia de oscilación propia* del circuito o también frecuencia de oscilación libre. Derivando q respecto al tiempo se obtiene la expresión para la corriente en el circuito, cuyos máximos estarán desfasados en $\pi/2$ respecto al voltaje en el condensador. Cuando se analiza el voltaje V_L en el inductor se obtienen ecuaciones similares. También oscilan las energías almacenadas en el inductor y en el condensador, etc.

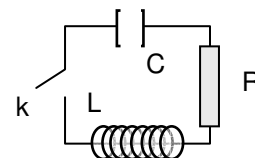
Quizás lo más importante a resaltar aquí es que no se cumplen las propiedades de los circuitos de corriente continua, donde sólo hay FEM y resistencias. Por ejemplo, al recorrer el circuito en un instante determinado, a pesar de que no hay FEM no se cumple que $V_C - V_L = 0$, pues los voltajes están *desfasados* (cuando uno es máximo, el otro es mínimo y viceversa). De manera que en los circuitos donde la corriente varía con el tiempo es imprescindible tomar en cuenta los desfases entre voltajes y corrientes para hacer cualquier análisis.

A.2 Circuito RLC

Consideremos un caso similar al anterior, tomando ahora en cuenta la resistencia de los alambres. Supondremos que esa resistencia está concentrada en un resistor de valor R (ver figura). La potencia instantánea disipada en la resistencia será $P = i^2R$, y en cada instante debe ser igual a la pérdida de energía almacenada en el circuito. Es decir,

$$dE/dt + i^2R = 0,$$

donde dE/dt es intrínsecamente negativa.



Sustituyendo la energía por su expresión en función de la carga en el condensador y la corriente en el inductor, simplificando y agrupando términos, se llega a:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad \tau = \frac{L}{R}$$

El parámetro τ tiene dimensiones de tiempo, y se denomina *tiempo de relajación* por razones que se harán evidentes más adelante. Esta ecuación es análoga a la del movimiento armónico amortiguado en Mecánica,

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$$

y por tanto la solución es similar:

$$q = q' \text{sen}(\omega t + \delta)$$

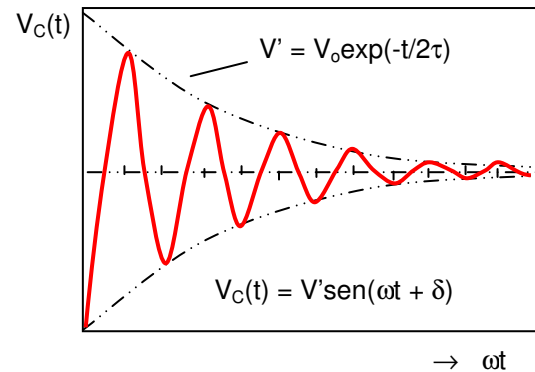
$$q' = q_0 e^{-t/2\tau}, \quad \omega^2 = \omega_0^2 - \frac{1}{4\tau^2}$$

Si se grafica el voltaje en el condensador $V_C = q/C$ en función del tiempo, se obtiene un gráfico como el de la figura. También se obtienen gráficos similares para la corriente y el voltaje en el inductor. La energía almacenada en el condensador en una de las oscilaciones vendrá dada por:

$$E_c(\text{máx}) = \frac{1}{2} \frac{q'^2}{C} = \frac{1}{2C} q_0^2 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

y llamando E_0 a la parte independiente del tiempo en la expresión anterior, se llega a:

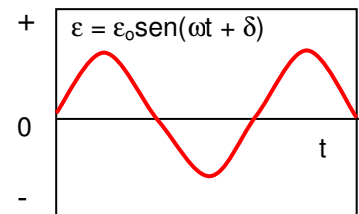
$$E = E_0 e^{-t/\tau}$$



Cuando ha transcurrido un tiempo $t = \tau$, entonces $E = E_0/e$, y la energía almacenada inicialmente ha disminuido $e \sim 2.7$ veces (de aquí el nombre de tiempo de relajación). Para $t \rightarrow \infty$ la energía del circuito se hace igual a cero, y la corriente se detiene.

A.3 FEM Alterna Aplicada a un Resistor

Una FEM alterna es cualquier fuerza electromotriz cuya polaridad varía periódicamente con el transcurso del tiempo. La FEM será *sinusoidal* si su variación temporal sigue una función seno (o coseno). La corriente correspondiente en el circuito será una *corriente alterna*. Se acostumbra designar la diferencia de potencial en los bornes de una FEM alterna por el término *voltaje*, indicando así la continua variación de la polaridad.



FEM alterna sinusoidal

En la resistencia de la figura, en cada instante se debe cumplir la ley de Ohm; $V_{ab} = iR$. Suponiendo que la fase inicial es cero ($\delta = 0$) para simplificar, la diferencia de potencial instantánea vendrá dada por

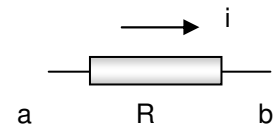
$$V_{ab} = V_0 \text{sen}(\omega t).$$

Despejando en la ley de Ohm tendremos:

$$i = V_{ab}/R = (V_0/R) \text{sen} \omega t$$

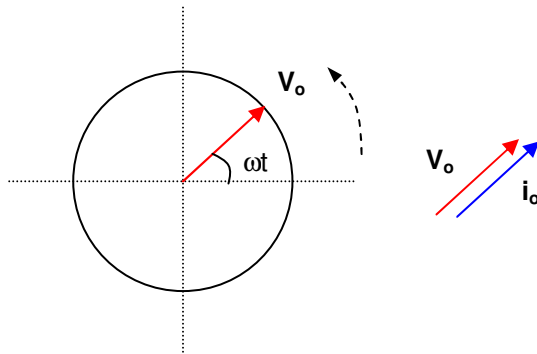
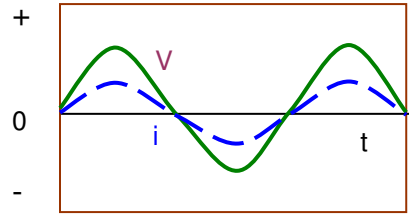
y llamando $i_0 = V_0/R$ se obtiene inmediatamente:

$$i = i_0 \text{sen}(\omega t)$$



Una primera conclusión muy importante es que, *en una resistencia, la corriente y el voltaje están en fase*. Significa que ambos parámetros alcanzan sus máximos y mínimos a la vez (ver figura).

Se acostumbra representar la corriente y el voltaje alternos mediante vectores que rotan con movimiento circular uniforme (MCU). De esta forma, el voltaje y la corriente instantáneos quedan representados por las proyecciones a lo largo del cualquiera de los ejes coordenados. Estos vectores, cuando se representan en el plano complejo, reciben el nombre de *fasores*.



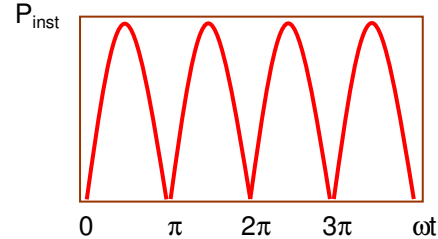
Como el voltaje en los extremos de una resistencia, y la corriente que la atraviesa están en fase, los vectores i_o y V_o son paralelos

Potencia Disipada

La potencia instantánea disipada en la resistencia viene dada por:

$$P = i^2 R = i_o^2 R \text{sen}^2(\omega t)$$

y varía con el tiempo de acuerdo al $\text{sen}^2(\omega t)$ (ver figura). Sin embargo, como la frecuencia de variación puede llegar fácilmente a miles de oscilaciones por segundo o más, resulta más útil trabajar con la potencia media \bar{P} . Aplicando el teorema del valor medio, la potencia media se puede calcular a partir de la siguiente expresión:



$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt$$

donde $T = 2\pi/\omega$ es el período de las oscilaciones. Sustituyendo $P = i_o^2 R \text{sen}^2(\omega t)$ en la integral anterior se llega a:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} i_o^2 R$$

Se puede establecer una analogía con la expresión de la potencia disipada por la corriente continua si se define la *corriente eficaz* en el circuito por la expresión

$$i_e = i_o / \sqrt{2}$$

Como $i_e^2 = i_o^2 / 2$, sustituyendo en la expresión de la potencia media se obtiene finalmente

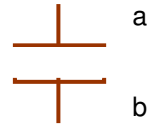
$$\bar{P} = i_e^2 R$$

Significa que la potencia disipada por una resistencia en CA se calcula de la misma forma que cuando pasa una corriente continua, siempre y cuando se utilice la corriente eficaz para hacer los cálculos. Los voltímetros y amperímetros de CA están designados para medir el voltaje eficaz, de manera tal que puedan aplicarse las fórmulas conocidas de CC para calcular los parámetros en CA.

A.4 FEM Alterna Aplicada a un Capacitor

Supongamos que en los extremos del condensador el voltaje instantáneo tiene la forma

$$V_{ab} = V_o \text{sen}(\omega t)$$



Entonces, de acuerdo a la definición de capacidad, $C = q/V_{ab}$;

$$q = CV_{ab}$$

$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dV_{ab}}{dt}$$

Considerando que $i = dq/dt$; $\cos(\omega t) = \text{sen}(\omega t + \pi/2)$, derivando y sustituyendo en la expresión anterior, se llega a:

$$i = CV_o \omega \text{sen}(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

Este resultado puede ser escrito como

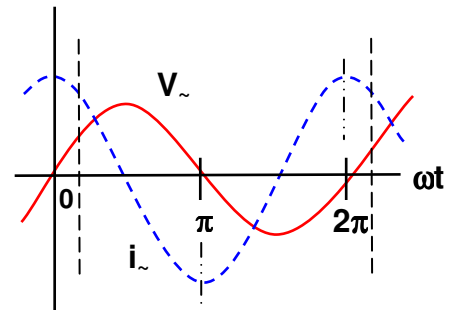
$$i = \frac{V_o}{X_C} \text{sen}(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

donde $X_C = 1/\omega C$. El parámetro X_C tiene dimensiones de resistencia y se denomina *reactancia capacitiva*. En resumen, la corriente tendrá la forma

$$i = i_o \text{sen}(\omega t + \pi/2)$$

$$i_o = V_o/X_C$$

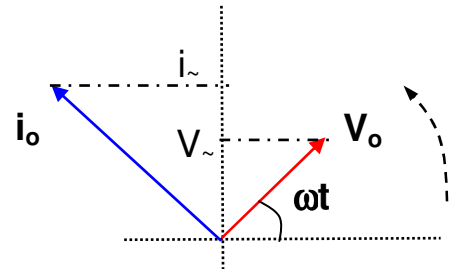
$$X_C = 1/\omega C$$



Comparando las fases del voltaje y la corriente se ve inmediatamente que el voltaje en el condensador se retrasa en $\pi/2$ respecto a la corriente:

$$i = i_o \text{sen}(\omega t + \pi/2)$$

$$V_{ab} = V_o \text{sen}(\omega t)$$



La figura de más arriba muestra el gráfico de la corriente y el voltaje en función del tiempo. Note que cuando V_C es máximo, $i_C = 0$, y viceversa. La representación vectorial del voltaje y la corriente en este caso particular queda como aparece en la figura adjunta.

Potencia disipada

La potencia media disipada se puede calcular aplicando el teorema del valor medio en un período; como la potencia instantánea se calcula a partir de $P = Vi$, entonces

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T V_C i_C dt$$

$$\bar{P} = \frac{V_o i_o}{T} \int_0^T \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\omega t + \frac{\pi}{2}) dt = 0$$

y el condensador ideal no disipa energía.

La energía se acumula en el condensador durante un semiperíodo (carga) y en el semiperíodo siguiente se revierte al circuito donde está conectado (descarga).

Los condensadores reales tienen pequeñas pérdidas de energía, a causa de la dispersión del campo en sus bordes y por las pérdidas asociadas al dieléctrico.

A.5 FEM Alterna Aplicada a un Inductor

Al pasar una corriente i por un inductor, la ley de Faraday establece que aparecerá una FEM inducida que se opone a la variación de la corriente, de valor absoluto

$$\epsilon_{\text{ind}} = L di/dt .$$

El voltaje en los extremos del inductor de la figura será, por tanto, $V_L = \epsilon_{\text{ind}}$.

Si la corriente varía en forma sinusoidal podemos expresarla como

$$i = i_0 \text{sen}(\omega t)$$

$$di/dt = i_0 \omega \text{cos}(\omega t) = i_0 \omega \text{sen}(\omega t + \pi/2)$$

Sustituyendo en la ley de Faraday para calcular $V_L = L di/dt$ se obtiene entonces:

$$V_L = i_0 \omega L \text{sen}(\omega t + \pi/2)$$

$$V_L = V_0 \text{sen}(\omega t + \pi/2)$$

$$V_0 = i X_L ; X_L = \omega L$$

El término $X_L = \omega L$ se denomina *reactancia inductiva*, y también tiene dimensiones de resistencia. Note que, contrariamente al caso del voltaje en el condensador, *ahora es el voltaje quien se adelanta a la corriente en $\pi/2$* .

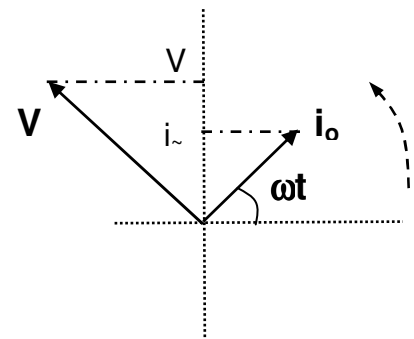
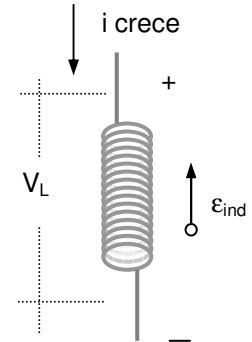
Potencia Disipada

De manera similar al caso del capacitor, es posible demostrar que la potencia media disipada en un inductor ideal es cero ($\bar{P} = 0$). En la realidad siempre hay presentes pequeñas pérdidas, a causa de la resistencia ohmica del enrollado. Si el inductor tiene un núcleo metálico, entonces las pérdidas de energía pueden llegar a ser muy altas, a causa de las corrientes inducidas y de las pérdidas por histéresis en el material del núcleo cuando éste es ferromagnético.

A.6 Ley de Ohm en Corriente Alterna

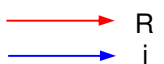
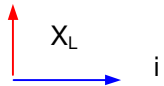
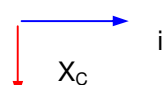
En los circuitos de corriente alterna la Ley de Ohm toma la forma

$$V = iZ$$



donde Z es la *impedancia* del circuito, que toma en cuenta la diferencia de fase introducida por cada dispositivo en el circuito. El voltaje V y la corriente i no se refieren a los valores instantáneos. Se refieren exclusivamente a los valores máximos del voltaje y la corriente i_0 y V_0 (o también a los correspondientes valores efectivos i_e y V_e , que sólo difieren de los anteriores en el factor $\sqrt{2}$).

En el caso de un circuito que contenga un solo elemento R, C ó L, tomando en cuenta lo analizado en las secciones anteriores, es fácil ver que la impedancia se calcula de acuerdo a lo expresado en la tabla siguiente. También se ha adicionado en la tabla el correspondiente desfase entre voltaje y corriente, la potencia disipada en cada caso y la notación vectorial que se utiliza para representar la impedancia asociada a cada elemento.

Elemento	Impedancia (Z)	desfase ($\Delta\phi$)	Potencia media	Notación vectorial
R	R	0	$i_e^2 R$	
L	$X_L = \omega L$	$+\pi/2$	0	
C	$X_C = 1/\omega C$	$-\pi/2$	0	

Si el circuito tiene dos o más elementos conectados en serie, es posible demostrar que la impedancia total viene dada por el módulo de la suma vectorial de las impedancias asociadas a cada elemento, y que el desfase entre el voltaje y la corriente se obtiene a partir del ángulo que forma Z con R.

El enunciado anterior se ilustra muy fácilmente considerando el siguiente ejemplo.

Calcular la impedancia de una resistencia de 4Ω conectada en serie con un condensador cuya reactancia capacitiva es de 3Ω .

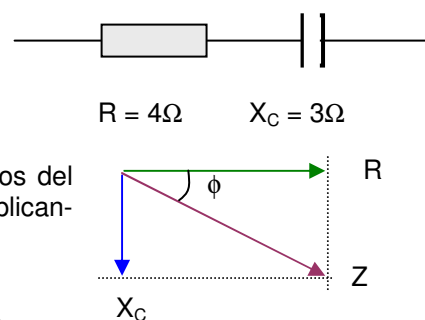
- Se construye un diagrama vectorial tomando en cuenta los desfases correspondientes (ver figura).
- La impedancia del circuito es la correspondiente suma vectorial;

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = (4^2 + 3^2)^{1/2} = 5 \Omega$$

Si se aplica una diferencia de potencial de 10 V en los extremos del circuito y se desea calcular la corriente en el mismo entonces, aplicando la ley de Ohm,

$$i_0 = V_0/Z = 10/5 = 2 \text{ A} .$$

El desfase entre el voltaje y la corriente se obtiene del ángulo que forma Z con R:



$$\tan\phi = X_C/R = -3/5 = -0.75$$

$$\phi = \arctan(-0.75) = 37^\circ = 0.646 \text{ rad}$$

Significa que el voltaje en los extremos del circuito se retrasa respecto a la corriente en 37° (hay una diferencia de fase de 37°). Finalmente, para la corriente y el voltaje tendremos:

$$i = 2\text{sen}(\omega t)$$

$$V = 10\text{sen}(\omega t - 0.646)$$

Cuando los componentes están conectados en paralelo, en vez de sumarse las impedancias se suman sus *admitancias*. Las admitancias se definen a partir de los inversos de las correspondientes impedancias, pero no serán objeto de estudio en este curso.

A.7 Potencia Disipada en un Circuito

Para calcular la expresión general de la potencia media disipada en un circuito de corriente alterna que va desde a hasta b, consideremos las expresiones siguientes. Para la potencia instantánea tendremos:

$$P = V_{ab}i; \quad i = i_o\text{sen}(\omega t); \quad V_{ab} = V_o\text{sen}(\omega t + \phi)$$

Aplicando el teorema del valor medio en un período T y agrupando términos, se obtiene:

$$\bar{P} = V_o i_o \frac{1}{T} \int_0^T \text{sen}(\omega t + \phi) \text{sen}(\omega t) dt$$

La integral multiplicada por $1/T$ toma el valor $\frac{1}{2} \cos\phi$, y sustituyendo $\frac{1}{2} V_o i_o$ en función del voltaje y la corriente efectiva, se llega a

$$P = V_e i_e \cos\phi$$

El término $\cos\phi$ se denomina *factor de potencia*.

Según este resultado, la potencia disipada en un circuito de corriente alterna depende tanto de los valores del voltaje y corriente como del desfase entre ambos. Para unos valores determinados de i_e y V_e su valor será máximo cuando $\cos\phi = 1$ ($\phi = 0$). El factor de potencia será igual a cero cuando $\phi = \pi/2$. Si en un circuito de corriente alterna se desea entregar la máxima potencia, se debe mantener el factor de potencia lo más cercano posible a la unidad. Si, por ejemplo, el circuito es altamente inductivo, se puede reducir el factor de potencia introduciendo condensadores en serie.

Las redes comerciales eléctricas utilizan este método usualmente para incrementar el factor de potencia, adicionando bancos de condensadores a las líneas de transmisión. Los motores de todo tipo (fábricas, ventiladores, reactores de luz fría) incrementan la parte inductiva y reducen el factor de potencia en forma significativa.

Ejemplo. Calcular la potencia media disipada en el circuito del ejemplo anterior.

$$P = V_{ab} i_o \cos\phi = \frac{1}{2} 10 \times 2 \times \cos(37^\circ)$$

$$P = 7.986 \text{ w}$$

A.8 Circuito RLC en Serie

El circuito que se muestra en la figura se presenta en la práctica en muy diversas ocasiones. También hay procesos que pueden representarse por analogía mediante un circuito RLC, pues se describen mediante las mismas ecuaciones. La diferencia de potencial en los extremos ab del circuito será igual a la FEM aplicada:

$$V_{ab} = \varepsilon_0 \text{sen}(\omega t)$$

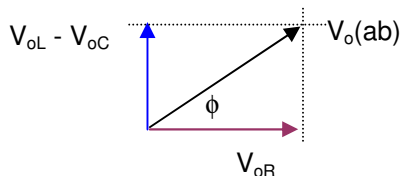
Desarrollando el diagrama vectorial para calcular la impedancia (ver figura), suponiendo que $X_L > X_C$ (en caso contrario las ecuaciones seguirán siendo válidas), se obtiene:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Aplicando la ley de Ohm para calcular la corriente máxima se llega a:

$$i_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Tomando en cuenta que la corriente es la misma en todos los elementos (conexión en serie) tendremos que $V_{oR} = i_0 R$; $V_{oC} = i_0 X_C$; $V_{oL} = i_0 X_L$; $V_o(ab) = iZ$. Significa que multiplicando los módulos de los vectores en el diagrama anterior por i_0 se obtiene un diagrama similar para los voltajes máximos. Es decir:



Si recordamos que el voltaje en la resistencia V_R está en fase con la corriente, entonces el desfase entre el voltaje y la corriente en los extremos del circuito se calcula a partir de

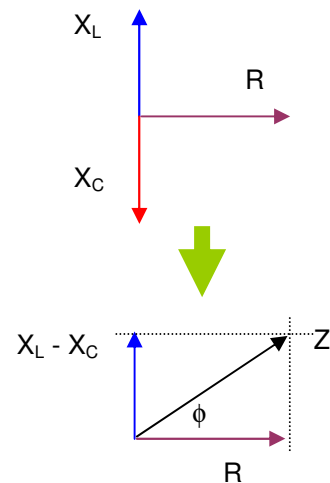
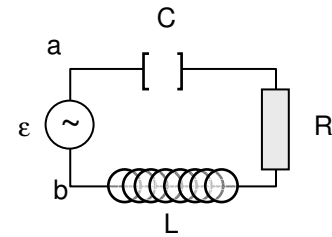
$$\tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{V_{oL} - V_{oC}}{V_{oR}}$$

Si $X_L > X_C$ el desfase ϕ será positivo, y el circuito tendrá carácter *inductivo* (V_{ab} se adelanta a la corriente). En caso contrario, $\phi < 0$ y el circuito es *capacitivo*. Del gráfico también se ve inmediatamente que

$$V_o(ab) = \sqrt{V_{oR}^2 + (V_{oL} - V_{oC})^2}$$

A.9 Resonancia

Analicemos en detalle la corriente máxima en el circuito en serie RLC. Expresando X_L y X_C en función de ω ,



$$i_o = \frac{\varepsilon_o}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Si la frecuencia angular ω de la FEM aplicada al circuito varía para un valor determinado de ε y R , la corriente máxima i_o también variará. El mayor valor posible de i_o tendrá lugar cuando $\omega L - 1/\omega C = 0$. Es decir, cuando

$$\omega L = 1/\omega C$$

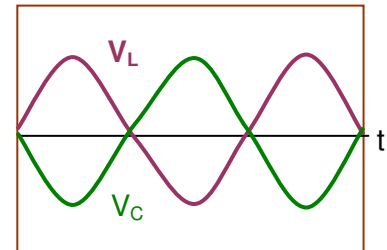
$$\omega = \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Significa que el mayor valor de la corriente máxima tendrá lugar cuando la frecuencia $f = \omega/2\pi$ de la fuente coincida con la frecuencia de oscilaciones propias del circuito analizadas en A.1:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

El fenómeno se conoce como *resonancia de tensiones* o simplemente como *resonancia*.

Note que en la resonancia $X_L = X_C$, y como tienen diferencia de fase de π (180°) la suma de V_L y V_C se anula en cada instante, aunque cada uno de estos voltajes no es nulo por separado. Significa, por ejemplo, que cuando el circuito de la derecha está en resonancia, si se conecta un voltímetro entre los puntos p y q se obtiene un voltaje no nulo dado por $V_C(\text{eficaz}) = (1/\sqrt{2})i_o X_C$.



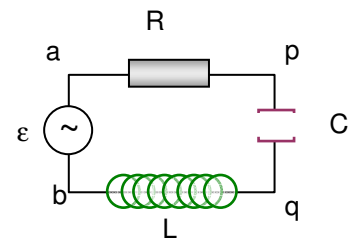
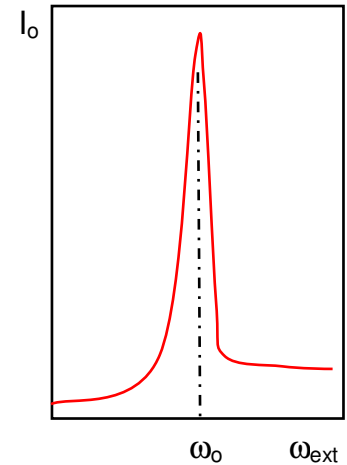
Si el voltímetro se coloca en los puntos qb también se obtiene un voltaje no nulo $V_L(\text{eficaz}) = (1/\sqrt{2})i_o X_L$. Sin embargo, cuando se coloca en los puntos pb se obtendrá $V_{pb} = 0$.

En la resonancia $\tan\phi = \frac{X_L - X_C}{R} = 0$, y no hay desfase entre el voltaje V_{ab} y la corriente. En ese instante $\cos\phi = 1$, la potencia disipada en el circuito es máxima y viene dada por

$$P = V_{ab}i = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_o^2}{R}$$

En resumen: en la resonancia:

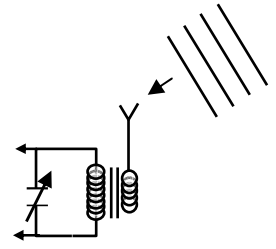
- Coinciden la frecuencia de la fuente externa y la frecuencia de oscilaciones propias del circuito: $\omega_{\text{ext}} = \omega_o$.
- La corriente en el circuito es la máxima posible
- La diferencia de fases entre el voltaje y la corriente es nula ($\phi = 0$)
- La suma de los voltajes en el condensador y el inductor se anula en todo instante.
- La potencia disipada (igual a la entregada) es máxima.



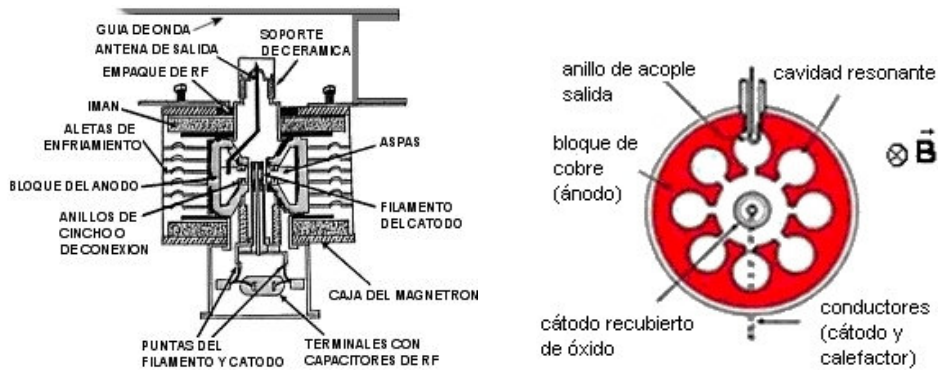
A.10 Algunas Aplicaciones de las Resonancias Electromagnéticas

I. Frecuencias de radio, TV y microondas.

1. Los circuitos de radio, TV y microondas se sintonizan gracias a la resonancia de la señal que proviene de la emisora con una frecuencia determinada y un circuito resonante del tipo RLC o similar.



2. Generación de microondas. Las señales de microondas empleadas en diversas aplicaciones (comunicaciones, hornos de microondas) se generan mediante el magnetrón. En este dispositivo, una corriente de electrones generada por una resistencia al rojo (que emite electrones) se introduce en un campo magnético que la hace rotar. Esa corriente interactúa con unas cavidades colocadas convenientemente. Se producen resonancias electromagnéticas en las cavidades al interactuar el campo magnético y las cargas eléctricas, que originan la emisión de radiación electromagnética. La frecuencia típica de un horno de microondas es de 2450 MHz.



3. Los relojes de cuarzo miden el tiempo con gran precisión gracias a una resonancia electromecánica que se establece al aplicar una señal eléctrica a una capa muy fina de cuarzo. Esta sustancia tiene la propiedad de realizar oscilaciones mecánicas al ser estimulada eléctricamente. Se logra producir una resonancia a frecuencia muy específica, y el período sirve de patrón para el resto del circuito que mide el tiempo.

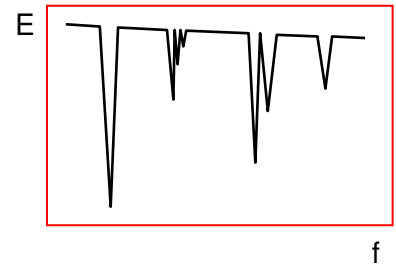
4. Los equipos de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) son bien conocidos en medicina e investigaciones. En este resuena el campo electromagnético externo de radiofrecuencias con el núcleo de los protones del agua. Como en la resonancia la absorción de energía es máxima, es posible obtener una imagen por contraste de las regiones del cuerpo en dependencia de la cantidad de agua que contienen los tejidos. También existen la RPE (Resonancia Paramagnética Electrónica) y la RFM (Resonancia Ferromagnética), que sólo mencionaremos.

II. Radiación infrarroja (IR), visible y ultravioleta (UV)

1. La radiación láser se basa en la resonancia de absorción/emisión de luz coherente proveniente de átomos excitados.

2. Los espectros de absorción están asociados a la máxima absorción que ocurre durante la resonancia al irradiar átomos y moléculas con radiación de diferentes frecuencias. La absorción tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación externa coincide con la de la radiación que es usualmente emitida por la sustancia, a causa de saltos en los niveles energéticos atómicos o de

rotación y vibración de las moléculas (donde se cumple la relación $\Delta E = hf$, donde ΔE es la diferencia en los niveles energéticos, f la frecuencia de la radiación y h una constante –la constante de Planck-.)



III Radiación Gamma

La Resonancia Gamma Nuclear o Espectrometría Mossbauer consiste en la interacción de esta radiación con los núcleos atómicos. Se aplica en diversas investigaciones. Un núcleo atómico excitado puede emitir radiación gamma. El espectro de absorción gamma se obtiene cuando la frecuencia de la radiación externa resuena con la frecuencia a la que el núcleo emite energía cuando es excitado. También se cumple $\Delta E = hf$, donde ahora ΔE se refiere a los niveles de energía en el núcleo. La energía se traspa al átomo y al sólido en cuestión, creando espectros característicos.